

# **ANÁLISE DE DESLOCAMENTOS MEDIDOS COM CONVERGENCIOMETRO DE HASTE NO TÚNEL SABUGAL-MEIMOA**

## **DISPLACEMENTS ANALYSIS MEASURED WITH STEM CONVERGENCIOMETER IN SABUGAL-MEIMOA TUNNEL**

Santos, Vítor; *Dept. Ciências da Terra, FCT-Univ. NOVA de Lisboa., Caparica, Portugal, silva.santos@gmail.com*

Olivença, Pedro; *CÊGÊ Lda, Algés, Portugal, pedro.olivenca@cege.pt*

Silva, Paula F. da; *Dept. Ciências da Terra e GeoBioTec, FCT-UNL, Caparica, Portugal, apfs@fct.unl.pt*

Brito, M. Graça; *Dept. Ciências da Terra e GeoBioTec, FCT-UNL, Caparica, Portugal, mgb@fct.unl.pt*

### **RESUMO**

Os túneis de pequeno diâmetro, escavados em maciços rochosos com recurso a tuneladora de escudo aberto, apresentam secção circular e oferecem à partida condições vantajosas em termos de estabilidade. Com base nos elementos recolhidos durante a escavação do Túnel Sabugal-Meimoa, analisa-se a dimensão dos deslocamentos, medidos com um convergenciómetro de haste. Perante um maciço rochoso metassedimentar de características geológicas-geotécnicas heterogéneas, o projeto de execução previa a existência de quatro zonas distintas, com o respetivo sustimento primário específico de forma a garantir a estabilidade da escavação. Tendo em conta as curvas teóricas de convergência-confinamento dos maciços, foram analisados os deslocamentos máximos medidos em função da qualidade do maciço rochoso, sustimento aplicado, distância à frente de escavação e o tempo decorrido até ao início das leituras, de modo a tornar as deformações resultantes comparáveis entre si. A análise foi realizada recorrendo a ferramentas de análise multivariada de dados, tais como a matriz de correlação (MC), análise de componentes principais (ACP) e análise fatorial de correspondências (AFC). O estudo desenvolvido permitiu verificar que, neste cenário geotécnico e construtivo, não existem relações entre as deformações medidas e o conjunto constituído pela qualidade do terreno e o sustimento aplicado. Também não são evidentes as relações entre as deformações máximas observadas e a distância à frente ou dias decorridos até ao início das leituras.

### **ABSTRACT**

Hydraulic small diameter rock mass tunnelling, using an open shield TBM, have circular cross section and usually offer favourable conditions in terms of stability. Based on the evidence gathered during the excavation of the Sabugal-Meimoa tunnel, the displacements measured with a stem convergenciometer are analysed. The tunnelling went through a metasedimentary rock mass, geologically and geotechnically heterogeneous, and to cope with this the project foresaw the existence of four distinct geotechnical zones, each with a specific primary support aiming to ensure the stability of the excavation. Given the theoretical curves of convergence-confinement of rock masses, maximum displacements were measured in respect to the rock mass quality, primary support, distance ahead of excavation and the time to onset of the reading, in order to obtain comparable results. The analysis was performed using multivariate analysis tools such as data correlation matrix (CM), principal component (PCA) and factor of correspondences analyses (FCA). It became possible to verify that there are no relations between the measured displacements and the different rock mass quality or the different type of primary support applied. Neither were observed obvious relations between the maximum displacements registered and the distance ahead of the excavation or days elapsed until the beginning of the monitoring.

### **1 - INTRODUÇÃO**

As curvas de deformação do maciço, em resposta à escavação de túneis, também conhecidas por curvas de convergência-confinamento, representam o comportamento elastoplástico do maciço e descrevem a evolução da deformação em função do tempo e da distância à frente de escavação (Hudson, 1993; Hudson & Harrison, 1997).

A escavação do túnel hidráulico Sabugal-Meimoa, integrado no circuito de regadio da Cova da Beira, de secção transversal circular, foi efetuada com recurso a tuneladora (TBM) de escudo aberto; este método, quando comparado com desmonte por explosivos, induz menor perturbação no maciço, em particular nas características das descontinuidades, o que se traduz em menor deformação, bem como menor necessidade de sustimento (Alber, 1996, 2000; Barton & Grimstad, 1994; Bieniawski *et al.*, 2007). A monitorização da empreitada contemplou a medição dos deslocamentos relativos do maciço, por meio de um convergenciómetro de haste. Os deslocamentos do maciço iniciam-se até pelo menos dois diâmetros

antes da frente de escavação ter atingido determinada secção transversal e processam-se de forma mais acentuada imediatamente após a escavação atingir essa secção.

Os valores de deformação medidos por este método podem ser influenciados por diferentes fatores, destacando-se como mais relevantes os seguintes:

- a) A qualidade do maciço rochoso, que foi determinada durante a escavação pelo índice RMR (Bieniawski, 1989), que resume as características do maciço, permite a sua classificação e, no caso em referência, o enquadramento nas zonas geotécnicas definidas no projeto de execução;
- b) O sustimento adotado em cada zona geotécnica, que como referido se encontrava definido no projeto;
- c) A distância à frente de escavação e tempo decorrido até à realização da primeira leitura, uma vez que influenciam o valor da deformação avaliada.

Neste último caso, salienta-se que a dimensão da TBM, incluindo todas as plataformas de apoio (decks), era superior a 100 m e limitadora do início das leituras, fazendo com que a distância à frente de escavação e o tempo decorrido até ao início das leituras fosse variável entre as várias secções de convergência instaladas ao longo do túnel.

O presente artigo pretende analisar, objetivamente, o comportamento e influência das variáveis acima listadas na deformação do maciço rochoso durante a escavação do túnel Sabugal-Meimoa. Adicionalmente avalia-se ainda a coerência das leituras registadas, através da relação entre os deslocamentos medidos nas diferentes direções, bem como o respetivo enquadramento, no contexto dos princípios do Método Observacional, da adequação dos procedimentos construtivos perante as condições geológicas-geotécnicas efetivamente observadas, tendo em vista a otimização da produtividade com consequente economia na construção de túneis, dentro de critérios de segurança.

## 2 - CASO DE ESTUDO

O Túnel Sabugal-Meimoa localiza-se próximo do Sabugal, distrito da Guarda, e visa garantir a transferência dos recursos hídricos disponíveis na albufeira da barragem do Sabugal, situada no Rio Côa, para a albufeira da Barragem da Meimoa, localizada na Ribeira da Meimoa, afluente do rio Zêzere, possibilitando uma maior oferta da quantidade de água disponível para o desenvolvimento rural e agrícola dos terrenos da Cova da Beira, a jusante da barragem da Meimoa, através de um sistema de regadio.

Este túnel tem um comprimento de aproximadamente 4100 m e uma secção transversal de escavação circular, com 3,6 m diâmetro. Na zona dos emboquilhamentos o declive da vertente era acentuado e, como tal, após os primeiros metros de escavação, o recobrimento era grande, chegando a um máximo de 80 m, rondando em seguida em média 50 m.

Em termos geológicos, estes terrenos são fundamentalmente constituídos por xistos e metagrauvaques, possivelmente correspondentes ao Câmbrico, uma vez que sobre este complexo assentam os terrenos com datação atribuída ao Ordovícico (Fig. 1). Segundo a divisão do Grupo das Beiras realizada por Silva et al. (1988), as características do maciço atravessado pelo túnel do Sabugal permitem enquadrá-lo na formação mais antiga (basal), designada por Formação de Malpica do Tejo.

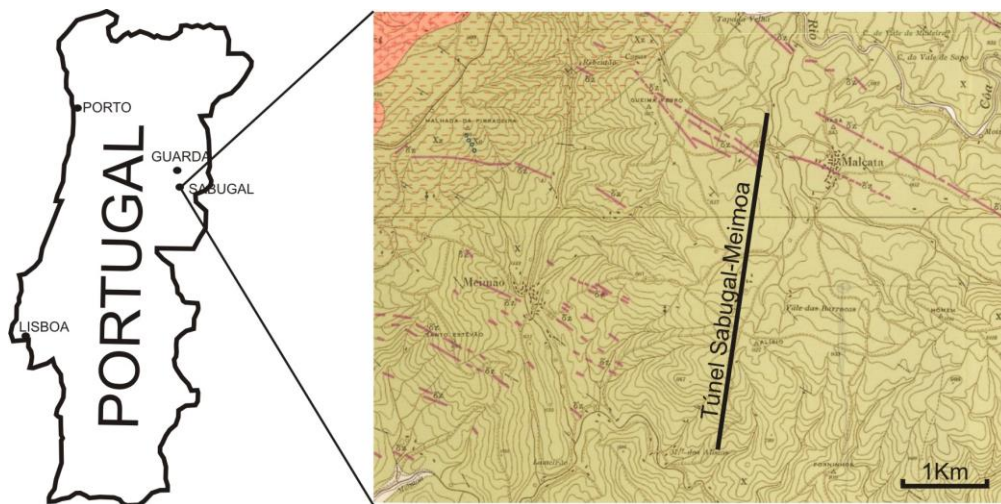


Figura 1 - Localização do túnel em infografia de um extrato da Carta Geológica 21-A, Sabugal (adaptado de Teixeira *et al.*, 1965)

Esta formação consiste na alternância monótona de xistos e metagrauvaques, com predomínio dos metagrauvaques, em bancadas que vão desde espessuras centimétricas a decimétricas e muito raramente métricas. A estrutura caracteriza-se pela orientação das bancadas próxima da vertical, derivada de intenso dobramento.

Relativamente às características geotécnicas e tendo em conta o método de escavação, assim como a geologia, o projeto de execução elaborado pela Tetraplano (2004) preconizava a ocorrência de quatro zonas geotécnicas (ZG), caracterizadas por intervalos de valor do respetivo índice RMR, com definição do correspondente sustimento a aplicar para garantir a estabilidade da escavação (Quadro I).

Quadro 1 – Zonamento e sustimento definido em projeto (Tetraplano, 2004)

Zona geotécnica	RMR	Sustimento
ZG1	> 60	1 a 2 pregagens no teto espaçadas de 1,5m
ZG2	50-60	2 pregagens no teto espaçadas de 1,5m e malhassol AQ50
ZG2 perturbada	20-50	2 pregagens no teto, 2 pregagens hasteais, espaçadas de 1,5m, malhassol AQ50 e 5 cm de betão projetado
ZG falha	< 20	Cambotas espaçadas de 1m, malhassol AQ50 e 10 cm betão projetado

O túnel foi escavado entre 2003 e 2004 com TBM de escudo aberto, o que permitiu observar e caracterizar de forma contínua o maciço rochoso interessado. Com base nessas características do maciço foi calculado o valor do índice RMR (Bieniawski, 1989), para enquadrar o terreno observado no zonamento geotécnico e a respetiva seção no tipo de sustimento preconizado em projeto (Quadro I).

Neste túnel, as secções de convergências, planos imaginários transversais ao eixo do túnel materializados por pontos fixos, cuja equidistância é medida com elevada precisão (ITA/AITES, 2011), incluíam três pontos fixos, um localizado no teto e, os restantes, um em cada hasteal. Esta configuração permite descrever um triângulo, com leituras das distâncias em 3 componentes diferentes, as designadas cordas de convergência (Fig. 2).

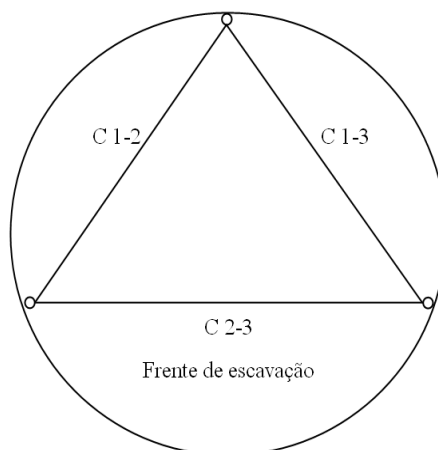


Figura 2 - Configuração da secção de convergência

A interpretação conjunta da deformação entre as diferentes cordas permite determinar o ponto que teve maior deformação. No presente caso, foi utilizado o convergenciómetro de haste, modelo desenvolvido pelo LNEC (1980), que tem uma exatidão de leitura da ordem da centésima de milímetro.

Ao longo do túnel foram instaladas 164 secções de convergência, com um espaçamento entre secções médio da ordem de 25m, ou com espaçamento inferior nos casos em que a qualidade do maciço rochoso era mais fraca. No total, obtiveram-se cerca de 2900 registos de deslocamentos.

### 3 - METODOLOGIA

A metodologia utilizada para analisar, objetivamente, a deformação observada durante a escavação do túnel Sabugal-Meimosa consiste no tratamento e análise dos diversos fatores que podem influenciar aquelas medições, e anteriormente listados, bem como apreciar da sua eventual interligação.

Numa primeira etapa, realizou-se uma descrição estatística das variáveis, com avaliação de valores mínimos e máximos, média, mediana, moda, variância e desvio padrão e sua discussão.

A segunda etapa consistiu na descrição do comportamento das variáveis e suas interligações, utilizando a análise multivariada de dados, nomeadamente a matriz de correlação (MC), a análise de componentes principais (ACP) e a análise fatorial de correspondências (AFC). Este tipo de análise torna possível confrontar a influência dos diversos fatores nos deslocamentos registados, nomeadamente do tempo e da distância à frente da secção de monitorização aquando da primeira leitura, assim como da qualidade do maciço escavado e da contenção aplicada na deformação total observada.

A MC, como o próprio nome indica, permite verificar a correlação entre pares de variáveis. No caso da análise de poucas variáveis, a interpretação é simples; todavia, no caso de muitas variáveis, como a apresentação de dados é em forma numérica, numa matriz, torna-se pouco perceptível de imediato a sua interpretação (Landim, 2010).

Para o estudo das variáveis quantitativas recorreu-se ao método de ACP que permite identificar as similitudes e dissimilaridades de um conjunto original de dados através da projeção gráfica, simultânea, dos indivíduos (ou amostras) e das propriedades, num mesmo plano fatorial.

A caracterização dessas combinações para a explicação dos indicadores iniciais constitui o resultado da aplicação deste método.

De acordo com Davis (2002), a AFC é adequada para analisar conjuntamente variáveis nominais e variáveis categóricas, como é o caso do zonamento geotécnico. Para utilização da AFC tornou-se necessário desenvolver previamente uma tabela de contingência a partir da matriz de dados originais, a qual é transformada em matriz de Burt, representando a frequência das variáveis da matriz de contingência (Hill & Lewicki, 2007).

Apresentam-se, seguidamente, os resultados da implementação do faseamento acima descrito, obtidos com recurso aos programas informáticos Excel e Statistica 10.

## 4 - RESULTADOS OBTIDOS

### 4.1 - Dados genéricos

Os resultados da aplicação da classificação geomecânica de Bieniawski (1989) às secções do maciço onde se encontravam instaladas as secções de convergência, encontram-se resumidos na Figura 3. Observa-se que se encontram representadas naquelas secções várias classes de qualidade do maciço, desde valores do índice RMR mais baixos, até aos mais elevados, todavia com claro predomínio destes.

O índice RMR calculado para o maciço permite, como referido, o respetivo enquadramento na zona geotécnica definida no projeto. Conforme representado na Figura 4, aproximadamente dois terços das secções de convergências localizam-se em maciço rochoso integrado na zona ZG1, enquanto no extremo oposto, as zonas de falha são contempladas com 9% do total das secções de convergências, a ZG2 corresponde a 14% e a ZG2 perturbada a 11%.

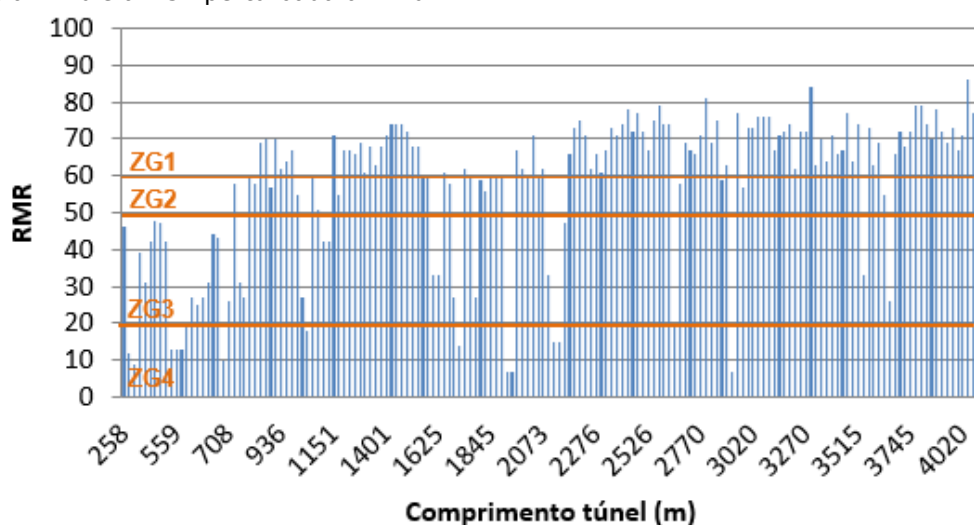


Figura 3 – Classificação geomecânica (Bieniawski, 1989) do maciço rochoso em cada secção de convergência

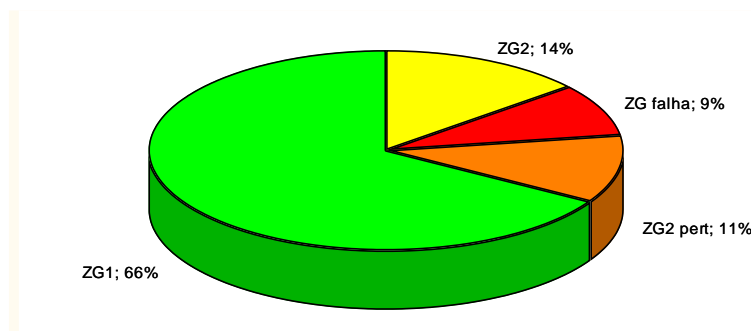


Figura 4 – Distribuição relativa das seções de convergência por zonamento geotécnico

Conforme salientado, a TBM com todos as plataformas de apoio com equipamentos e tapete para remoção do escombro, tinha um comprimento próximo de 100 m. Observando a Figura 6, é evidente que habitualmente as leituras se iniciavam com um distanciamento à frente inferior a 100m, ou seja ainda dentro da zona ocupada pela TBM e plataformas de apoio.

Com base na Figura 5, verifica-se ainda a presença de situações pontuais, onde o início das leituras ocorreu quando a frente de escavação se encontrava já a grande distância. Estas situações correspondem a situações muito específicas, em locais não previstos inicialmente em projeto, mas onde a observação de indícios de instabilidade, como fissuras no betão ou queda de pequenos blocos, levou à necessidade de efetuar a respetiva monitorização numa fase ulterior.

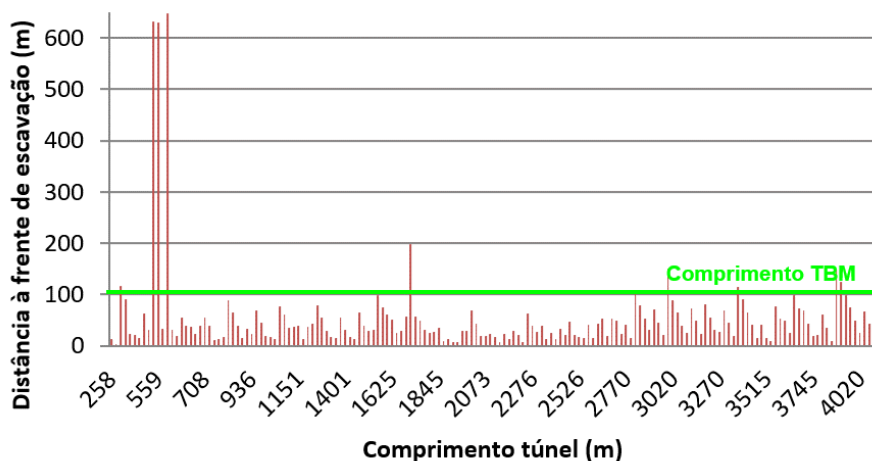


Figura 5 – Distância à frente de escavação do início da primeira leitura

O tempo decorrido entre a escavação de determinada secção transversal do túnel e o início das leituras de monitorização dos deslocamentos era habitualmente inferior a 5 dias e, raramente, ultrapassava os 10 dias, exceto em situações pontuais que correspondem aos trechos acima descritos, de instalação de novas secções de monitorização em locais não previstos inicialmente (Fig. 6).

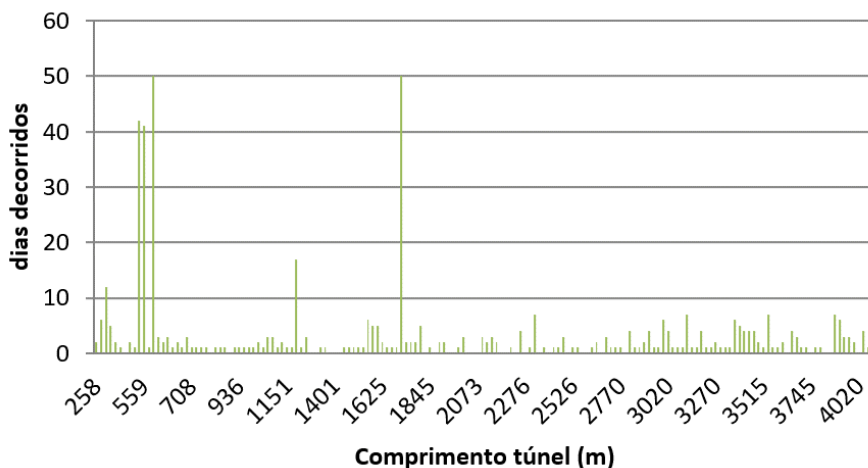


Figura 6 – Dias decorridos entre a escavação da secção de convergências e a primeira leitura

Os dados disponíveis sobre o deslocamento máximo, medido nas várias secções instaladas ao longo do túnel, encontram-se apresentados em forma gráfica na Figura 7.

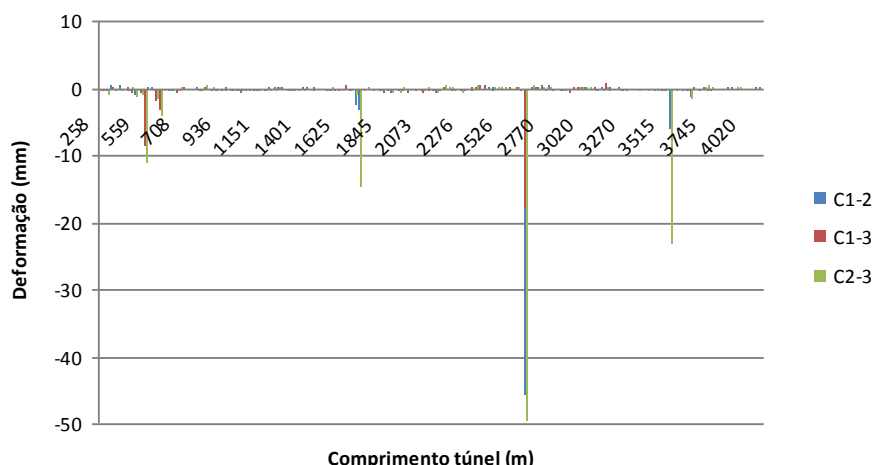


Figura 7 – Deformação do maciço nas várias cordas que compõem as 164 secções de convergência

#### 4.2 - Estatística descritiva

A estatística descritiva das variáveis em estudo encontra-se sintetizada no Quadro 2. Verifica-se que, em média, a deformação não chegava a 1 mm, num maciço com índice RMR médio de 58, embora o intervalo de variação oscile entre o mínimo de 7 e máximo de 86. O mais frequente era as medições das convergências se iniciarem no dia seguinte à escavação da secção instrumentada, o que correspondia a uma distância média de 15 m em relação à frente de escavação.

Quadro 2 – Estatística descritiva das variáveis envolvidas na deformação do maciço rochoso

	Casos	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Variância	Desvio padrão
RMR	164	57,6	66,0	7,0	86,0	398,156	19,954
C1-2	164	-0,50	-0,2	-45,90	0,40	13,072	3,615
C1-3	164	-0,37	-0,2	-18,00	0,70	2,574	1,604
C2-3	164	-0,79	-0,1	-49,70	0,30	20,169	4,491
Distância	164	53,26	36,5	3,00	649,00	7316,649	85,537
Dias	164	2,97	1,0	0,00	50,00	51,355	7,166

#### 4.3 - Matriz de correlação

Recorrendo a uma MC (Quadro 3), observa-se que valor do índice de RMR apresenta correlações baixas com as deformações totais medidas.

O tempo decorrido até ao início das leituras, assim como a distância à frente aquando do início das leituras, revela também correlações fracas com a deformação total observada.

A matriz de correlação permite ainda verificar uma elevada correlação entre as deformações medidas nas diferentes cordas, revelando fraca anisotropia de deformação nas diferentes direções (horizontal e sub-vertical). Dentro destas, destaca-se uma correlação ligeiramente superior entre a corda horizontal (C2-3) e as restantes, do que entre as cordas associadas à deformação vertical (C1-2 e C-1-3).

Quadro 3 – Matriz de correlação entre variáveis

	RMR	C1-2	C1-3	C2-3	Distância	Dias
RMR	1,00	0,199	0,311	0,289	-0,255	-0,371
C1-2	0,199	1,00	0,884	0,915	-0,005	-0,031
C1-3	0,311	0,884	1,00	0,912	-0,007	-0,019
C2-3	0,289	0,915	0,912	1,00	-0,031	-0,153
Distância	-0,255	-0,005	-0,007	-0,031	1,00	0,865
Dias	-0,371	-0,031	-0,019	-0,153	0,865	1,00

#### 4.4 - Análise das componentes principais

A ACP permite determinar associações entre diferentes variáveis e a sua redundância, com projeção em novos eixos que explicam a variância máxima entre as variáveis (Reis, 2001). De acordo com a metodologia apresentada, foram utilizados os dados após realização de padronização da matriz original.

Na definição do número de componentes a considerar na análise, foram utilizados dois métodos, os definidos por Kaiser (1960) e o definido por Cattell (1966).

O critério de Kaiser (1960) aponta como fatores relevantes para a análise de componentes principais, os que apresentam valores próprios superiores à unidade. No Quadro 4 pode-se verificar que os fatores com valores próprios que cumprem essa condição se limitam aos dois primeiros.

Quadro 4 – Valores próprios de cada eixo principal

Fator	Valor próprio	% Total - variância	Valor próprio acumulativo	% acumulativa
1	2,962	49,368	2,962	49,368
2	1,978	32,973	4,940	82,341
3	0,754	12,567	5,694	94,908
4	0,167	2,785	5,862	97,693
5	0,104	1,736	5,966	99,428
6	0,034	0,572	6,000	100,000

Segundo o critério do ponto de variação brusca (Cattell, 1966), que define os fatores representativos das amostras e pela Figura 8, infere-se que os fatores acima de 3 se encontram dispostos em alinhamento próximo do paralelo com o eixo dos números de valores próprios, isto significa que, respeitando o critério referido, podem ser eliminados, obtendo-se os três fatores iniciais como mais relevantes.

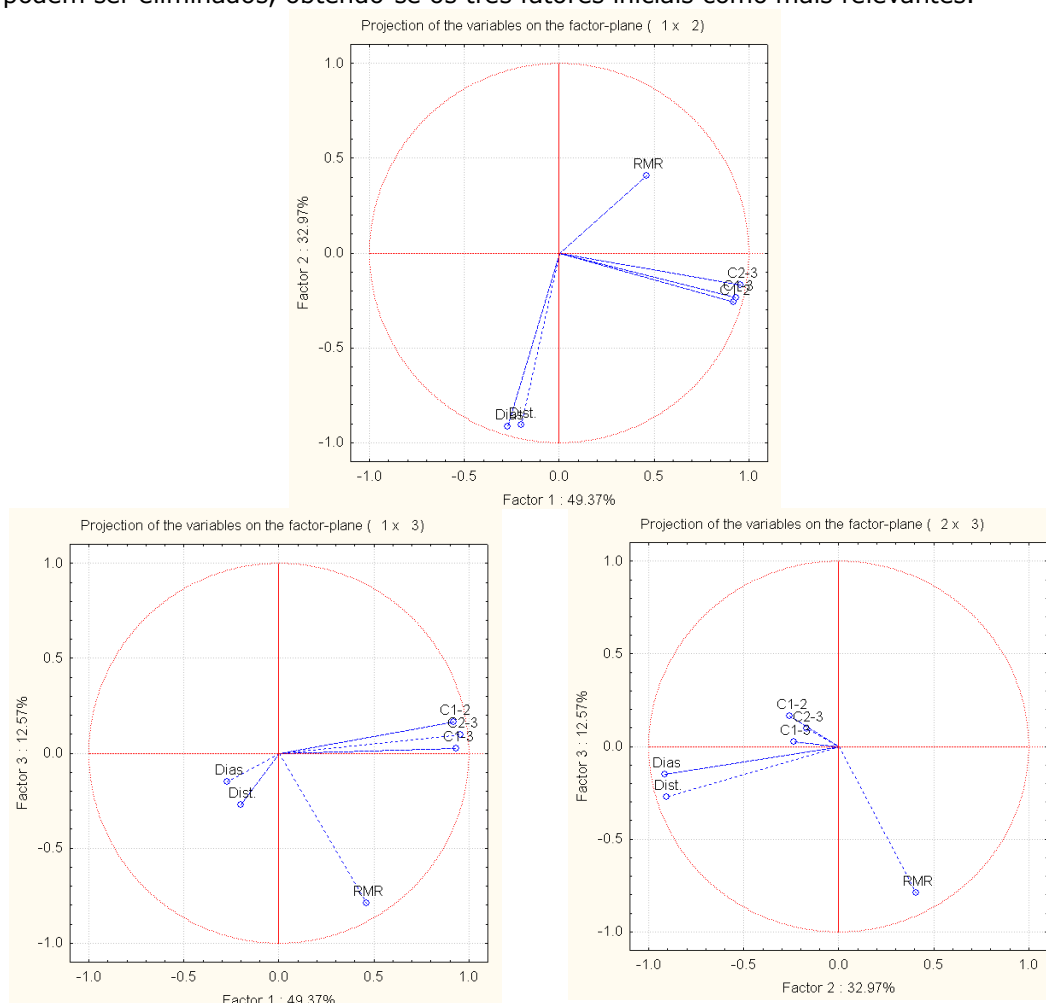


Fig. 8– Resultados da ACP. Descrição da relação entre variáveis

Os fatores principais a reter na análise, selecionados por dois critérios diferentes, mostram diferença no número a considerar. Segundo Hill & Lewicki (2007), no caso de haver diferença no número de fatores a

considerar não há uma forma de optar por um em detrimento do outro, ficando ao critério do utilizador a seleção.

No Quadro 4, os dois fatores principais representam conjuntamente 82,34% da variância, o que se pode considerar aceitável para este tipo de análises (Reis, 2001), mas adicionando o terceiro fator chega-se a 94,91%, que significa a representação de quase toda a variância. Assim considera-se nesta análise estes três eixos principais.

A Figura 8 revela, para os fatores 1 e 2, grande afinidade entre a deformação medida nas diferentes cordas de cada secção e uma forte correlação entre a distância à frente e o tempo decorrido até à primeira leitura das secções de convergência. O índice RMR surge separado dos grupos anteriores, o que significa ausência de relação com os grupos definidos pelas restantes variáveis.

A projeção das variáveis nos eixos dos fatores 1 e 3 e 2 e 3 continua a evidenciar grande correlação entre as várias cordas que constituem as secções de convergência, assim como entre a distância à frente e os dias decorridos até à leitura inicial, assim como o índice RMR permanece isolado, mas já se encontra bem representado nestes fatores.

#### 4.5 - Análise fatorial de correspondências

A análise fatorial de correspondências permite analisar variáveis categóricas, mas para tal é necessário tratar a matriz de dados de forma a decompor as variáveis qualitativas em valores de contingência, representativos das categorias (Quadro 5).

Os valores de deformação observados nas diferentes cordas foram divididos em três categorias, sendo a primeira representativa de valores de deformação que não excedem 1 mm; a segunda contempla valores de deformação no intervalo entre 1 mm e 10 mm; e a terceira categoria valores superiores a 10 mm.

A variável distância à frente de escavação no momento da primeira leitura foi dividida também em três categorias, correspondendo a primeira a distâncias inferiores a 50 m; a segunda categoria representa o início das leituras a distâncias compreendidas entre 50 m e 100 m; e a outra ao início das leituras a distâncias superiores a 100 m da frente de escavação.

Os dias decorridos até ao momento da primeira leitura foram igualmente agrupados em três categorias, correspondendo à primeira as leituras realizadas nos 2 dias após a escavação; a segunda categoria representa o início das leituras compreendidas entre 2 e 5 dias após escavação da secção e outra categoria o início das leituras 5 dias após a escavação.

O conjunto da qualidade do maciço, determinada pela classificação de Bieniawski (1989), e sustimento aplicado, é representado pelo zonamento geotécnico, o qual constitui por si categorias, representadas na análise realizada ordinariamente como ZG1, ZG2, ZG3 e ZG4, respetivamente para as denominações de projeto de ZG1, ZG2, ZG2 perturbado e ZG falha.

Quadro 5 – Categorias das variáveis

Categoria	Deformação (mm)	Distância (m)	Dias	Zonamento
1	<1	<50	<2	ZG1
2	1-10	50-100	2-5	ZG2
3	>10	>100	>5	ZG2 perturbado
4				ZG falha

Projetando graficamente as variáveis correspondentes aos fatores considerados, verifica-se a interligação entre as categorias das diferentes variáveis (Figura 9), onde é visível a proximidade entre deslocamentos de menor amplitude (C1-2:1, C1-3:1 e C2-3:1) o início das leituras a distâncias mais reduzidas (Dist:1 e Dist:2), bem como o menor tempo decorrido (Dias:1 e Dias:2) e a localização da secção na zona ZG1 e na ZG2 (Zon:1 e Zon:2).

As deformações enquadradas na categoria intermédia (C1-2:2, C1-3:2 e C2-3:2) surgem com maior proximidade com a maior distância da frente (Dist:3) e o início tardio das leituras (Dias:3), encontrando-se localizadas nas zonas ZG3 e ZG4 (Zon:3 e Zon:4).

As deformações de maior dimensão encontram-se em termos gráficos afastadas das restantes variáveis (C1-2:3, C1-3:3 e C2-3:3).



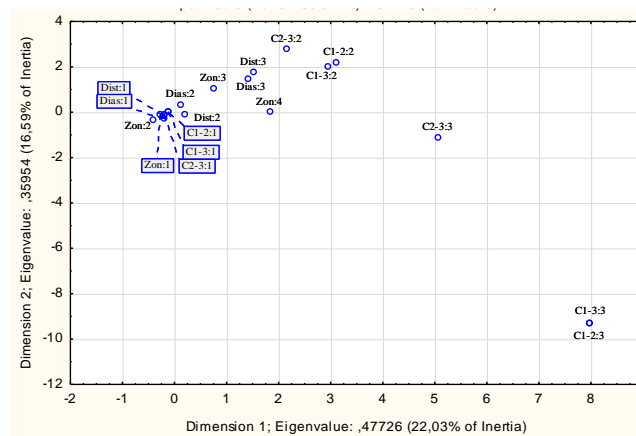


Figura 9 – Resultados da AFC – comportamento das categorias das variáveis

## 5 - DISCUSSÃO DE RESULTADOS

As deformações observadas ao longo do túnel são, na generalidade, de valor baixo, embora se encontrem algumas exceções pontuais de deslocamentos mais elevados que chegam a ultrapassar os 10 mm.

A falta de correlação entre a deformação medida e a distância à frente, assim como entre a deformação e o tempo decorrido entre a escavação e a primeira leitura, mostra independência destas duas situações no deslocamento máximo observado o que, conjugado com as deformações baixas registadas, leva a considerar que:

- As deformações se dão imediatamente após a escavação, ou
- Este método de escavação e o pequeno diâmetro favorecem a estabilidade, não perturbando a boa qualidade do maciço.

A falta de correlação entre os deslocamentos registados e o zonamento geotécnico leva a considerar que:

- o maciço deforma muito pouco, ou
- a contenção aplicada se encontra sobredimensionada, não deixando o maciço desenvolver qualquer deformação. Neste contexto, durante a construção, uma análise inserida na filosofia do Método Observacional (Peck, 1969), devidamente fundamentada permitiria a otimização do sustento aplicado o que, neste caso, corresponderia ao seu eventual aligeiramento.

As deformações de valor muito baixo encontram-se particularmente associadas à ZG1 e ZG2 que representam 80% do maciço observado, enquanto as deformações intermédias surgem mais próximas do zonamento geotécnico representativo do maciço rochoso de qualidade mais fraca. Os maiores valores de deslocamentos medidos surgem de forma independente das restantes variáveis analisadas nesta investigação, porque:

- se encontram eventualmente associadas a outras variáveis que não foram consideradas, ou
- representam situações pontuais, muito particulares de algumas falhas.

Neste último caso, regista-se que a maioria das zonas de falha não apresenta deformação significativa, todas as ocorrências de deformação significativa se deram em zonas de falha.

Os dados mostram que a distância à frente na altura da primeira leitura também não influencia a deformação total registada, o que tem como justificação:

- a inexistência de uma deformação significativa que permitisse verificar essa correlação, ou
- a deformação do maciço, a ocorrer, será imediatamente após a escavação, antes do início da monitorização, que se inicia apenas a 100 m da frente.

A matriz de correlação assim como a ACP, mostram grande afinidade entre os valores de deslocamentos registados nas diferentes cordas que integram as diversas secções de convergência. A consistência dos resultados registados permite considerar a homogeneidade do maciço relativamente às deformações horizontais e verticais e que as leituras estão coerentes e foram realizadas com precisão e exatidão.

Aquelas duas análises multivariadas de dados revelam ainda afinidade significativa entre a distância à frente da secção instrumentada e os dias decorridos até ao início das leituras, o que seria à partida expectável uma vez que o avanço da escavação se desenrolou genericamente de forma mais ao menos constante em termos de avanços médios diários.

A análise da correlação entre o valor do índice de RMR e os deslocamentos registados leva a considerar que estas duas variáveis são independentes. No entanto, há que ter em conta que a deformação medida não se limitava ao maciço, mas ao conjunto maciço/sustimento e, neste aspecto, a AFC revela já uma ligeira relação entre a ausência de deformação e as zonas geotécnicas de melhor qualidade, bem como entre as deformações intermédias e a zona geotécnica de qualidade mais fraca. Contudo, ressalva-se novamente que, exceto situações muito particulares, os valores de deslocamentos registados foram muito baixo (em média, inferiores a 1 mm).

## **6 - CONCLUSÕES**

Para o túnel hidráulico analisado, com secção circular, pequeno diâmetro (3,6m) e escavado com recurso a TBM de escudo aberto, os valores de deslocamentos do maciço metassedimentar registados recorrendo ao convergenciómetro de haste, foram de baixo valor.

O maciço de melhores características geotécnicas, enquadrado nas zonas ZG1 e ZG2, apresenta deformações muito reduzidas (em média, inferiores a 1 mm). As deformações de valor intermédio (em média, entre 2 e 10 mm) surgem associadas às zonas do maciço de características geotécnicas mais fracas, embora de forma pouco pronunciada. As deformações de maior dimensão (em média, superior a 10 mm) são pontuais e não se verifica relação com qualquer uma das variáveis consideradas neste estudo.

A distância à frente de escavação, assim como o tempo decorrido até ao início das leituras, não revelam relação com a deformação total observada, concluindo-se que não existem deformações significativas devido à presença de um maciço rochoso, à geometria circular da secção transversal e do método de escavação adotado. Na generalidade não se observam as curvas de convergência-confinamento do maciço, porque o instante zero da escavação não é observado e as deformações são imediatas após a escavação e estabilizam antes do início da monitorização, numa dada secção, que em média apenas ocorre no dia seguinte, com a frente a 15 m de distância.

Desde que devidamente justificada e enquadrada pelos procedimentos mais recentemente descritos para o Método Observacional seria possível, na fase construtiva, adequar as soluções preconizadas no projeto, às condições geológicas-geotécnicas reais encontradas o que, neste caso de estudo, nos trechos onde se verificou ausência de deslocamentos poderia ter resultado em economia, quer no sustimento aplicado, quer no tempo despendido na sua colocação, mantendo-se assegurada a segurança e a estabilidade da escavação.

A correlação encontrada entre as diferentes cordas das secções de convergência é elevada, indicando coerência e fiabilidade das leituras realizadas com este método e um comportamento isotrópico do maciço rochoso.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à DGADR – Direção Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural pela autorização concedida para a utilização de dados recolhidos no âmbito da construção do Túnel Sabugal-Meimoa.

O trabalho de Paula Silva e Graça Brito foi apoiado pela UID/GEO/443 04035/2013.

## **REFERÊNCIAS**

- Alber, M. (1996). Design of high speed TBM-drives. In *8th International IAEG congress*, pp. 3537–3543. Rotterdam.
- Alber, M. (2000). Advance rates for hard rock TBMs. *Tust*, (1), 15.
- Barton, N., & Grimstad, E. (1994). The Q-System Following Twenty Years of Application in NMT Support Selection. *Felsbau*, 12(6), 428–436.
- Bieniawski, Z. (1989). *Rock Mass Classifications*. John Wiley & Sons.
- Bieniawski, Z., Celada, B., & Galera, M. (2007). Prediction TBM escavability. *Tunnels & Tunnelling International*, 25–28.
- Cattell, R.B. (1966). The scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral Research*, (1), 629–637.

- Davis, J.C. (2002). *Statistics and data analysis in geology* (3rd edition). John Wiley and Sons.
- Hill, T., & Lewicki, P. (2007). *Statistics: Methods and Applications*. Tulsa: StatSoft.
- Hudson, J. (1993). *Comprehensive rock engineering. Volume 4: Escavation, support and monitoring*. Pergamon.
- Hudson, J., & Harrison, J. (1997). *Engineering rock mechanics. an introduction to the principles*. Pergamon.
- ITA/AITES. (2011). Monitoring and control in tunnel construction. Retrieved February 21, 2012, from [http://www.ita-aites.org/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/ProductAndPublication/ItaReports/ITAReport\\_N9\\_WG2\\_P.pdf](http://www.ita-aites.org/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/ProductAndPublication/ItaReports/ITAReport_N9_WG2_P.pdf)
- Kaiser, H.F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*, (20), 141–151.
- Landim, P.M.B. (2010). Introdução à análise estatística de dados geológicos multivariados. Retrieved October 8, 2012, from <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/>
- LNEC. (1980). *Projecto de um convergenciómetro de haste*. Lisboa.
- Peck, R.B. (1969). Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Géotechnique*, 19(2), 171–187. <http://doi.org/10.1680/geot.1969.19.2.171>
- Reis, E. (2001). *Estatística multivariada aplicada* (2ª ed). Silabo.
- Silva, A., Romão, J., Sequeira, A., & Ribeiro, M.L. (1988). Geotransversal do Grupo das Beiras (Complexo Xisto-Grauváquico) entre os sinclínórios de Mação e Penha Garcia (Centro Leste de Portugal). In *XI Reunião Geológica do Oeste Peninsular*. Bragança.
- Teixeira, C., Martins, J., Medeiros, A., Mesquita, L., Peres, A., & Pilar, L. (1965). *Noticia Explicativa da Carta Geológica Folha 21-A – Sabugal na escala 1/50000*. Lisboa.
- Tetraplano. (2004). *Projecto de execução do Túnel Sabugal-Meimoa. Escavação com TBM*.